

Как измерить новый килограмм

<https://znanauku.mipt.ru/2019/05/20/kak-izmerit-novyj-kilogramm/>

Автор [Екатерина Жданова](#) 20.05.2019 Время прочтения: 8 минут Сложность материала: 6

Итак, решение развенчать килограмм [принято](#), и с 20 мая 2019 никому уже не отвертеться от нового эталона. Давайте разберёмся аккуратно, как теперь учёный мир будет измерять единицу массы.



Платино-иридиевый цилиндр и кремниевая сфера, старый и новый килограмм. Источник: NIST

Почему новый килограмм был нужен

Старый килограмм действительно имеет почтенный возраст: Метрическая конвенция назначила его задающим единицу массы ещё [в 1875 году](#). То есть именно тогда метрологическое сообщество провозгласило килограмм массой международного прототипа килограмма (ИПК, от английского — International Prototype of the Kilogram, IPK). Роль ИПК все ещё играет платино-иридиевый цилиндр высотой и диаметром 39 миллиметров, который изготовили в 1889-м. Тогда же сделали ещё 42 точных копий — их разделили между странами-участниками конвенции, чтобы там могли следить за единством измерений, периодически обращаясь напрямую к французскому цилиндру.

За годы службы эталонов проводились неоднократные сличения с ИПК — в 1889, 1948, 1989 и 2014 годах. Сверка показала, что эталоны «расползлись» за сто с небольшим лет на 20–50 микрограммов. Несмотря на высокую химическую устойчивость платино-иридиевого сплава, эталоны все равно подвергаются испарению и диффузии (они не только «худеют»). В современном мире с растущими требованиями к точности измерений набег расхождений масс эталонов тревожен: такое непостоянство — на грани утраты

функциональности, ведь накапливающаяся неточность грозит потерей первоцели эталонов — обеспечения единства измерений.

Метрологи давно предлагали перевести все основные величины на определения через фундаментальные физические константы (ФФК). Некоторые величины (секунда, метр, ампер, кандела) обрели свои квантовые «фамилии» ещё давно, а на последней конференции в ноябре 2018 года пришёл черед килограмма и его брата — моля, который был определен, по сути, через массу (а теперь завязан на ФФК — постоянной Планка и числе Авогадро).

Новое определение и сфера вместо цилиндра

До 26-й Генеральной конференции по мерам и весам килограмм был привязан к физическому объекту, а не природной константе. На конференции все изменилось кардинально: всем известная мера массы теперь определяется через постоянную Планка, значение которой фиксированное и равно $6.62607015 \times 10^{-34}$ кг*м²/с. Секунда и метр определены в терминах значений скорости света и частоты квантового перехода в цезии, которые, в свою очередь, так же, как и постоянная Планка, являются фиксированными ФФК. Другими словами, новый «килограмм» теперь не отождествляется с массой эталонного цилиндра, а завязывается на значениях достаточно точно измеренных постоянных.

Новое определение отрывает единицу массы от физического объекта, что тут же вызвало множество вопросов, ведь миру по-прежнему надо взвешивать объекты, измерять их массы и уточнять измерительные приборы. Метрологический мир нашёл два решения.

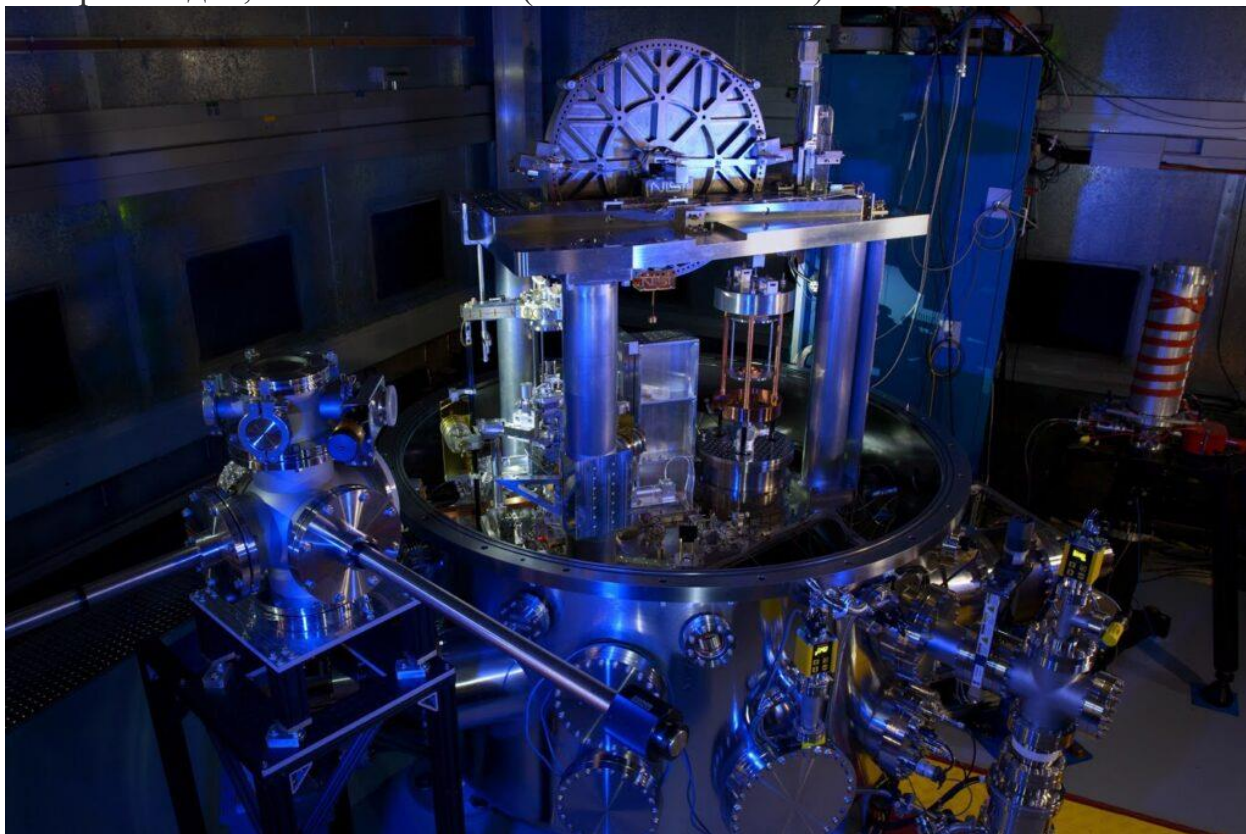
Во-первых, можно создать более «абсолютный» эталон. То есть такой, который максимально точно мог бы воспроизводить единицу массы, но при этом и сам был бы воспроизводимым. И учёные создали такой объект — это сфера из кремния-28 максимально технологически возможной «чистоты», которую [проверяли](#) исследователи из Национального института метрологических исследований (Италия) и Австралийской организации ядерной физики и технологий с помощью нейтронно-активационного анализа. Метод позволяет очень точно определять элементный состав образца. В результате была подтверждена высокая степень чистоты: концентрация примесей порядка от фемтограммов до нанограммов на грамм кремния.

Кремний был избран в качестве основного материала для нового «физического» килограмма, так как благодаря развитию полупроводниковых технологий в мире освоены способы получения «чистого» кремния. Основным фиксированным параметром для кремниевого эталонозаменителя является число атомов. Структура кремния известна, и у любой достаточно оснащенной лаборатории есть возможность воссоздать сферический килограмм (в вакууме, безусловно). Способ не самый бюджетный (каждая такая сфера [стоит](#) 3,2 миллиона долларов), но он смещает фокус от конкретного объекта в сторону его точного определения и потенциальной заменимости.

Интересно, что создатели кремниевой сферы — коллаборация «Международный проект Авогадро» — по сути, занимались более точным определением числа Авогадро (N_A). То есть логически-метрологическая цепочка такова: есть 1 кг (цилиндр), делаем точную копию по массе (сфера из кремния), хорошенько ее исследуем самыми современными методами (определяем радиус сферы, кристаллическую структуру), зная точную массу каждого атома кремния-28, считаем, сколько в сфере атомов, и таким образом определяем число Авогадро. Уточнённое значение константы оказалось равно $6.02214076 \times 10^{23}$, неточность 20 частей на миллиард. В таком виде теперь постоянную фиксируют для переопределения единицы моля. А далее применим обратный подход: зная точное число атомов, структуру, размеры и состав сферы, мы имеем возможность воспроизвести килограмм, пользуясь постоянной Авогадро, — все снова через ФФК.

Взвесим по-новому

Вторая возможная реализация нового определения единицы массы — так называемый электронный килограмм. Чтобы понять, как такой килограмм работает, давайте сначала рассмотрим прибор, который единицу массы воспроизводит, — весы Киббла (the Kibble balance).



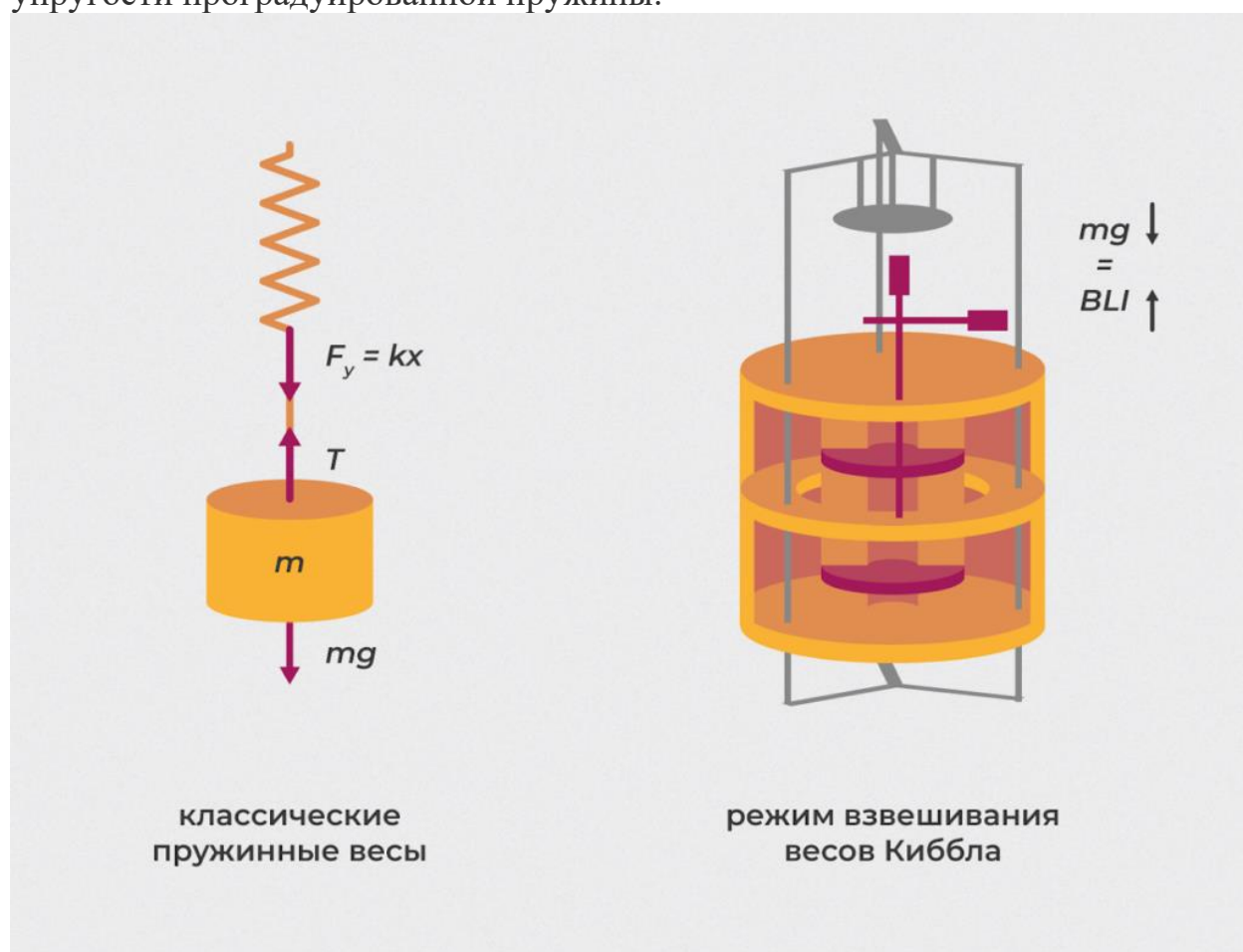
Аппарат был разработан в Национальной физической лаборатории в Великобритании в 1975 году и известен под несколькими именами — его называют ватт-весами с движущейся катушкой, или весами Киббла. Первое название отражает физическую и техническую суть устройства, второе имя весы приобрели после смерти своего разработчика Брайана Киббла в 2016 году.

Первоначально конструкция разрабатывалась для замены оборудования, реализующего ампер по старому механическому определению. В общем, и сейчас ватт-весы в сочетании с эталоном единицы ома могут воспроизводить единицу вольт и ампера. Но основным их применением первоначально стало точное измерение постоянной Планка, а затем реализация единицы килограмма на основе фиксации полученного значения константы.

Напомним, раньше ампером называлась «сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 метр один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 метр силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Ньютона».

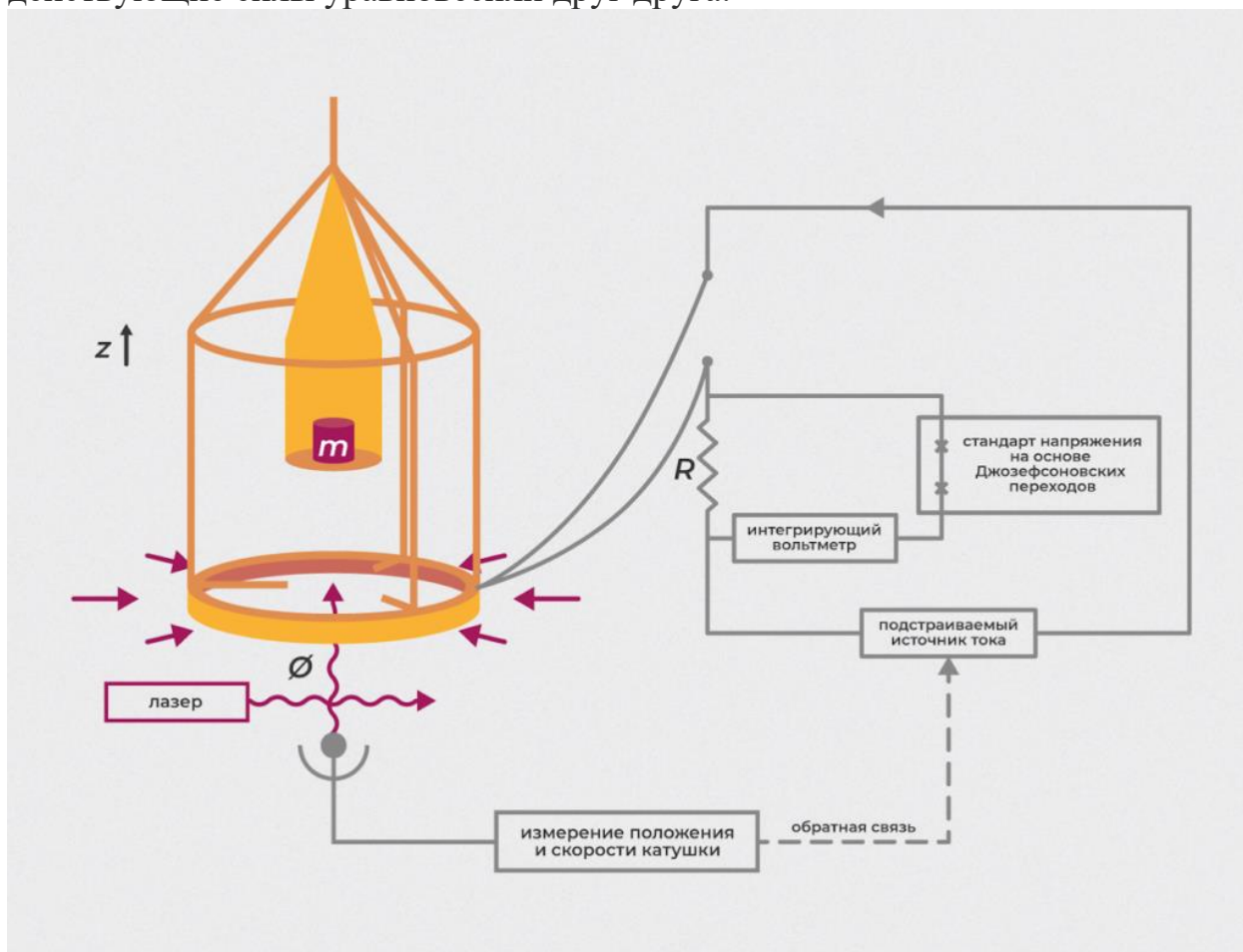
Весы Киббла и функционируют в двух основных режимах: взвешивания и движения.

Представим классические ручные весы, в них измерение массы происходит за счёт уравнивания двух сил — силы тяжести измеряемого объекта и упругости проградуированной пружины.



В режиме взвешивания на весах Киббла гравитационная сила уравнивается электромагнитной. Взвешиваемый образец помещается в

специальную чашку, а ток через катушку подбирается таким образом, чтобы действующие силы уравновесили друг друга.



Режим движения основан на явлении электромагнитной индукции. Измеряемый объект удаляется за ненужностью, а катушка движется в магнитном поле. Цель такого дополнительного измерения проста: косвенно и с меньшей погрешностью измерить параметр магнитного поля – плотность магнитного потока в зазоре постоянного магнита — необходимый для итогового вычисления массы.

Гонка за точностью

Чтобы обеспечить точное измерение или воспроизведение массы, необходимо выполнить ряд вещей, уменьшающих неточности. Один из шагов — упомянутая выше калибровка, устраняющая неопределённость измерения индукции магнитного поля и линейного размера катушки. Следующий шаг — наиболее точно определить значения всех входящих в уравнение ватт-баланса величин.

Скорость движения катушки измеряется с помощью лазерного интерферометра, а благодаря открытию в 1980 году квантового эффекта Холла и ранее известному к тому времени эффекту Джозефсона появилась возможность точной и стабильной реализации единиц ома и вольты соответственно.

Также в устройство ватт-весов входит гравиметр. Он измеряет точное значение ускорения свободного падения (которое входит в уравнение для вычисления массы) в том месте, где находится измеряемая масса. Сегодня несколько существующих весов Киббла воспроизводят единицу массы в диапазоне от миллиграммов до килограммов с точностью $2 \text{ на } 10^{-8}$.

Приключения нового килограмма в России

Наш отечественный килограмм «увольнять» в 2019-м никто не планирует. Результаты сверки с МПК действуют до 2024-го года. А наш килограмм к тому же ещё вёл себя хорошо: по словам хранителя государственного эталона Виктора Снегова, сотрудника ВНИИМ им. Д. И. Менделеева (организации Росстандарта), отклонился только на 1 микрограмм за 20 лет. Хранитель говорит, что ещё лет 10 наш эталон должен держаться в рамках требуемой точности. К этому сроку российские метрологи планируют реализовать независимый килограмм с необходимой точностью.

«В рамках национального проекта будут создаваться отечественные весы Киббла на основе многолетнего опыта других стран, но пока непонятно, кто конкретно будет реализовывать новое определение килограмма у нас», — говорит Виктор Снегов.

Но все реформы касаются первичных метрологических уровней. Госэталон должен будет со временем воспроизводить единицу массы с точностью, заданной определением. Передаваться килограмм на второй уровень должен будет в условиях вакуума, то есть в условиях калибровки первичного эталона. А далее — уже передача единицы массы в условиях атмосферы другим измерительным приборам (вплоть до бытовых весов) не будет никак отличаться от того, что было раньше.

Кстати, передача единицы осуществляется с помощью ещё одних специальных весов — компаратора массы. Работает эта машина на принцип электромагнитной компенсации — так же, как и ватт-весы в режиме взвешивания, когда измеряемая масса уравнивается током. Компаратор при этом, конечно же, дает гораздо меньшую точность.

Детальное описание принципа работы весов

Учёные любят формулы, и на формальном языке принцип работы ватт-весов демонстрируется очень наглядно. Привлечём силы школьной физики. Весу объекта Mg сопоставляется вертикальная составляющая магнитной силы BL , действующая на проволочную катушку с током в сильном магнитном поле B с известной скоростью v . Такое движение по закону электромагнитной индукции Фарадея индуцирует разность потенциалов $U=BLv$ на концах катушки. Так как и магнитное поле, и сама катушка те же, что и в первом случае, величина плотности магнитного потока BL остаётся прежней, а режим движения является калибровочным шагом, позволяющим избавиться от неопределённости измерения значения BL .

То есть с одной стороны мы имеем равенство сил $Mg=BIl$, с другой — соотношение $U=BLv$ (закон индукции Фарадея). Итоговое уравнение после исключения произведения BL имеет вид: $Mgv=UI$. Размерность обеих сторон уравнения — единицы мощности, поэтому весы Киббла изначально назывались ватт-весами, а итоговое выражение сопоставляет электрическую и механическую мощности.

Внимательный читатель может задать вопрос: если работа весов определяется уравнением $Mgv=UI$, то какое во всей этой истории место занимают постоянная Планка и определение килограмма через ФФК? А ответ кроется в технической реализации точных измерений электрического тока и напряжения.

Эффект Джозефсона заключается в следующем: если два сверхпроводника разделить тонким слоем изолятора и через полученный «сэндвич» пропустить электромагнитное излучение микроволнового диапазона, то разность потенциалов на концах конструкции будет пропорциональна частоте излучения, а коэффициент пропорциональности равен $h/2e$, где h — постоянная Планка, а e — заряд электрона. Конструкция сверхпроводник-диэлектрик-сверхпроводник называется «Джозефсоновский контакт», именно она лежит в основе воспроизведения единицы вольта в системе СИ через ФФК — заряд электрона и постоянную Планка.

Все для того же уменьшения неопределённости ток в уравнении баланса не измеряют прямо, а поставляют эквивалентное выражение по закону Ома $I=U/R$. Напряжение мы умеем точно воспроизводить, сопротивление — тоже, но на основе уже другого эффекта — [квантового эффекта Холла](#). Благодаря открытию Клауса фон Клитцинга в 1980 году у инженеров-микроэлектроников появилась возможность создавать стандарты с точно заданным значением сопротивления с неопределённостью на уровне миллиардной доли Ома. Математически говоря, благодаря вышеописанным квантовым эффектам электрическую мощность можно сопоставить с частотой, постоянной Планка и зарядом электрона и, соответственно, через уравнение ватт-баланса связать постоянную Планка, секунду и заряд электрона с килограммом.

Необходимо будет немного преобразовать уравнение ватт-баланса так, чтобы в левой части была только масса, а в правой — все остальные величины. Напряжение представляется в виде $U(n)=hf/2e$, где n — квантовое число. Сопротивление, соответственно, $R(p)=h/pe^2$. Электрическая мощность выражается через квантовые величины как $UI=U*U/R=(hf/2e)^2*h/pe^2$. Из уравнения баланса мощностей мы получим: $m=p*n^2*f^2*h/(4gv)$.

Это и есть то самое выражение массы через фундаментальные константы природы. Точное вычисление параметров правой части уравнения обеспечивает вычисление массы, а подбор этих параметров — воспроизведение.